

10.631.854
09.02.2003

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2001-142040

(P2001-142040A)

(43) 公開日 平成13年5月25日 (2001.5.25)

(51) Int.Cl.⁷

G 0 2 F 1/09

識別記号

5 0 5

F I

G 0 2 F 1/09

テ-マ-ト* (参考)

5 0 5 2 H 0 7 9

審査請求 未請求 請求項の数 5 O L (全 7 頁)

(21) 出願番号

特願平11-324878

(22) 出願日

平成11年11月16日 (1999.11.16)

(71) 出願人 000134257

株式会社トーキン

宮城県仙台市太白区郡山6丁目7番1号

(72) 発明者 本間 洋

宮城県仙台市太白区郡山6丁目7番1号

株式会社トーキン内

(72) 発明者 佐々木 伸浩

宮城県仙台市太白区郡山6丁目7番1号

株式会社トーキン内

Fターム (参考) 2H079 AA03 BA01 CA01 CA04 DA13

EA13 KA01 KA05 KA20

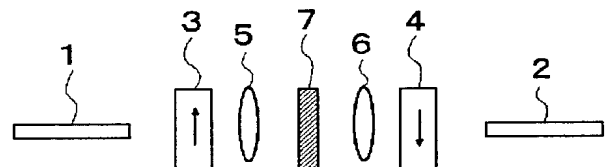
(54) 【発明の名称】 光アッテネータ

(57) 【要約】

(修正有)

【課題】 入射する光の偏光状態による減衰量の変動を小さくした光アッテネータを提供すること。

【解決手段】 第1の光ファイバ1と、偏光方向が互いに直交する2つの直線偏光の光線方向を平行に保ったまま分離または合成する第1の偏光分離素子3と、コリメータ用もしくは結像用の第1のレンズ5と、1枚もしくは複数枚の磁気光学素子を組み合わせた磁気光学素子群7と、収束用の第2のレンズ6と、偏光方向が互いに直交する2つの直線偏光の光線方向を平行に保ったまま分離または合成する第2の偏光分離素子4と、第2の光ファイバ2をこの順に配列して成り、前記第1の光ファイバ1から出た光が、前記第1の偏光分離素子3により、偏光方向が互いに直交する2つの直線偏光の光線に分離された後、前記第1のレンズ5により進行方向を曲げられ、前記磁気光学素子群7のほぼ同一の地点を透過するような構成とする。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 第1の光ファイバと、偏光方向が互いに直交する2つの直線偏光の光線方向を平行に保ったまま分離または合成する第1の偏光分離素子と、コリメータ用もしくは結像用の第1のレンズと、1枚もしくは複数枚の磁気光学素子を組み合わせた磁気光学素子群と、収束用の第2のレンズと、偏光方向が互いに直交する2つの直線偏光の光線方向を平行に保ったまま分離または合成する第2の偏光分離素子と、第2の光ファイバをこの順に配列してなり、前記磁気光学素子群に対する外部磁界の印加手段が、定常磁界の印加手段と、前記定常磁界にはぼ直交する磁界強度可変の磁界印加手段によって構成され、前記第1の光ファイバから出た光が、前記第1の偏光分離素子により、偏光方向が互いに直交する2つの直線偏光の光線に分離した後、前記第1のレンズにより進行方向を曲げられ前記磁気光学素子群の位置で交差し、前記磁気光学素子群のほぼ同一の地点を透過することを特徴とする光アッテネータ。

【請求項2】 前記第1と第2の偏光分離素子による偏光分離の方向が、ほぼ逆方向であることを特徴とする請求項1記載の光アッテネータ。

【請求項3】 前記第1と第2のレンズの主面間の間隔をほぼ両者の焦点距離の和とすることを特徴とする請求項1ないし2記載の光アッテネータ。

【請求項4】 前記定常磁界の印加手段は永久磁石であり、前記磁界強度可変の磁界印加手段は電磁石であることを特徴とする請求項1ないし3記載のアッテネータ。

【請求項5】 前記定常磁界とほぼ直交する可変磁界の強度が零であるときの前記磁気光学素子群のファラデー回転角が $\pi/2$ rad以上であることを特徴とする請求項1ないし4記載の光アッテネータ。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、主として、光通信装置や光情報処理装置において、光強度を減衰させて調整する光アッテネータに係わり、特に波長多重用の光ファイバアンプにおいて、各波長における増幅率を補正するのに好適な磁気光学結晶を含むファラデー回転子を備えてなる光アッテネータに関する。

【0002】

【従来の技術】従来、磁気光学結晶を用いた光アッテネータは、公開特許公報、平06-051255(光アッテネータ)において記述されている構成が代表的なものである。その例を図8および図9に記す。まず、第1の例においては、図8に示すように、磁気光学結晶83に、永久磁石84および電磁石85により互いに直交する向きに磁界が印加されていて、透過する直線偏光である光ビーム81は前記磁気光学結晶83にてファラデー回転を受けた後に、偏光子82に入射する構成である。

【0003】前記磁気光学結晶83は、透過光と同じ向

きの永久磁石84が発生させる印加磁界により常に磁気飽和されているが、さらに透過光とは垂直な向きに可変電流源86で制御された電磁石85から発生する印加磁界が存在する。その結果、印加磁界の総和の向きが光ビーム81の透過する向きからずれることになり、ファラデー回転角が変化する。これにより偏光子82を透過した後の光ビーム81の光量は上記可変電流源86によって任意に制御できることになり、光アッテネータを構成することができる。

10 【0004】ところで、永久磁石84を用いなく、透過光と同じ向きの電磁石による磁界印加のみを行う方法では、光アッテネータとして十分な機能を発揮することはできない。これは、磁気光学結晶83として磁性ガーネット結晶であるビスマス置換ガドリニウム鉄ガーネット($GdBi)_3(FeAlGa)_5O_{12}$ などが用いられているためで、これらの結晶は、一般に強いヒステリシスを有するために、未飽和の状態では、印加した外部磁界と、それにより生じるファラデー回転角の関係が一意的に定まらないためである。そこで、これら磁気光学結晶に一定の大きさ以上の外部磁界を常に印加して磁気飽和させておき、その上で直交する外部磁界の大きさを変化させることでファラデー回転角を制御する方法が開発された。この構成が同公報記載の光アッテネータの発明の内容である。

【0005】上記の第1の例では、入射する光ビームは偏光方向の定まった直線偏光であることが前提となっている。入射光ビームが任意の偏光状態にあるときには、その偏光状態に応じて減衰量に変化する。上記公開特許公報、平06-051255に記された第2の例は、入射光が任意の偏光であっても、偏光状態による減衰が生じることがない、いわば偏光無依存型の光アッテネータである。この例を図9に示す。

【0006】この図9において、光ファイバ91から出射した任意の偏光状態にある光ビーム98は、レンズ93によって集光されて平行光となり、テーパ状複屈折結晶95に入射する。そこで、互いに直交する2成分の直線偏光に分離し、ファラデー回転子97を透過した後、テーパ状複屈折結晶96、レンズ94を順に透過して集光され、光ファイバ92に達し、再び1本の光ビームに合成される。

40 【0007】ここで、ファラデー回転子97は、上記第1の例における磁気光学結晶83、永久磁石84、電磁石85および可変電流源86を総合したものに相当し、可変電流源86を操作することにより、そのファラデー回転角を制御して、光ファイバ92に結合する透過光の割合を変化させる。この透過光が最大となる場合は、各光学素子の透過損失や光学系の結合損失を除き、透過光の2つの偏光成分は光ファイバ92に達し、上記第1の例とは異なり、入射光の偏光状態に起因する減衰を受けることはない。

【0008】

【発明が解決しようとする課題】図9に示す上記の公開特許公報、平06-051255の第2の例では、光ファイバ91から出射した任意の偏光である光ビーム98は、テーパー状複屈折結晶95において互いに直交する2成分の直線偏光に分離した後、ファラデー回転子97に入射する。この場合、ファラデー回転子97を構成する磁気光学結晶を透過する際に、図9にも示されるように、偏光分離された2種類の直線偏光の光ビームは、一般に互いに離れた位置を透過することになる。

【0009】ところで、ファラデー回転子を構成する磁気光学結晶に互いに直交する2方向の磁界を印加し、磁化方向を変化させた場合、透過光に対するファラデー回転角の場所によるばらつきが無視できなくなり、結果として、偏光分離された2種類の直線偏光が、それぞれ受ける磁気光学効果に特性の差が生じる。

【0010】図4に、光アッテネータに一般的に用いられる磁気光学結晶におけるファラデー回転角の場所によるばらつきの一例を示す。この測定は、透過光と同じ向きに磁界印加する永久磁石、および透過光に対し直交する方向に磁界を印加する電磁石を用い、この電磁石に50mAの電流を流して行ったもので、この電流値は透過光に直交する向きに約500Gの磁界を印加したことに相当する。磁気光学結晶は、透過光に垂直な面が1mm×1mmの正方形をなすビスマス置換ガドリニウム鉄ガーネット $[(\text{GdBi})_3(\text{FeAlGa})_5\text{O}_{12}]$ 素子であり、透過光と同じ向きに磁界印加する永久磁石により磁気飽和していて、その印加磁界強度は、磁気光学結晶の磁気飽和に必要な磁界強度を上回る250G程度となっている。

【0011】図4に示した測定値は、前記磁気光学結晶における、光透過面の中心付近の $400\mu\text{m} \times 400\mu\text{m}$ の領域におけるファラデー回転角の測定値の分布である。図4によれば、磁気光学結晶の中心付近においてさえ、互いに $100\mu\text{m}$ 離れた位置で、ファラデー回転角の相違が1degに達する場合がある。この現象は、光アッテネータの減衰量に対し、その減衰量が小さい場合は殆ど影響を与えないが、減衰量大きい場合には、減衰特性の偏光依存性として現れる。言い換えれば、光アッテネータに直線偏光を入射して、入射光の偏光面を回転させると、光減衰量が大きく変動する現象となる。従って、上記の公開特許公報、平06-051255の第2の例として示された各光学素子の構成は、偏光に依存する減衰量の変動を小さくすることに関しては問題があった。

【0012】そこで、本発明は、入射する光の偏光状態に起因する減衰量の変動を小さくした光アッテネータを提供することを課題としている。

【0013】

【課題を解決するための手段】図4に示した磁気光学結

晶のファラデー回転角の場所によるばらつきの実例では、測定値は実際にはなめらかに連続的に変化している。従って、光アッテネータを構成する各光学素子のうち、磁気光学結晶に入射する偏光分離された2種類の直線偏光が互いにごく近接した位置を透過するならば、ファラデー回転角が磁気光学結晶内で場所により異なっていることの影響を抑えることが出来る。2種類の直線偏光をできるだけ近接させるために、2つの光ファイバの間の構成として、第1の平行平板複屈折結晶と、コリメータ用または結像用レンズ、および単独または複数の磁気光学結晶、収束用レンズ、第2の平行平板複屈折結晶を、この順に組み合わせて用いることで、磁気光学結晶に入射する2成分の直線偏光が、互いに近接した位置を透過し得る構成が実現可能である。

【0014】なお、第1の光ファイバと第1の平行平板複屈折結晶と、コリメータ用の1枚のレンズ、1枚のファラデー回転子、収束用の1枚のレンズ、第2および第3の平行平板複屈折結晶と第2の光ファイバをこの順に配列し、偏光方向が直交する2成分の直線偏光が磁気光学素子内のほぼ同一の地点を透過する光デバイスとしては、特許公報、第2905847号、光アイソレータ装置がある。しかし、同発明が解決した課題は、高価な偏光分離素子の厚さを小さくすることであり、偏光方向が直交する2成分の直線偏光を磁気光学素子内のほぼ同一の地点で透過させることではなかった。

【0015】即ち、本発明の光アッテネータは、第1の光ファイバと、偏光方向が互いに直交する2つの直線偏光の光線方向を平行に保ったまま分離または合成する第1の偏光分離素子と、コリメータ用もしくは結像用の第1のレンズと、1枚もしくは複数枚の磁気光学素子を組み合わせた磁気光学素子群と、収束用の第2のレンズと、偏光方向が互いに直交する2つの直線偏光の光線方向を平行に保ったまま分離または合成する第2の偏光分離素子と、第2の光ファイバをこの順に配列してなり、前記磁気光学素子群に対する外部磁界の印加手段が、定常磁界の印加手段と、前記定常磁界にほぼ直交する磁界強度可変の磁界印加手段によって構成され、前記第1の光ファイバから出た光が、前記第1の偏光分離素子により、偏光方向が互いに直交する2つの直線偏光の光線に分離した後、前記第1のレンズにより曲げられ前記磁気光学素子群の位置で交差し、前記磁気光学素子群のほぼ同一の地点を透過することとを特徴とする。

【0016】また、本発明の光アッテネータは、前記第1と第2の偏光分離素子による偏光分離の方向を、ほぼ逆方向にして構成することができる。

【0017】さらに、本発明の光アッテネータは、前記第1と第2のレンズの主面間の間隔をほぼ両者の焦点距離の和とする構成にすることができる。

【0018】また、本発明の光アッテネータは、前記定常磁界の印加手段は永久磁石であり、前記磁界強度可変

の磁界印加手段は電磁石とすることができる。

【0019】さらには、本発明の光アッテネータは、前記定常磁界とほぼ直交する可変磁界の強度が零であるときの前記磁気光学素子群のファラデー回転角を $\pi/2$ rad以上とすることにより減衰量の可変範囲を大きくとることができる。

【0020】

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施の形態について、図面を参照して説明する。

【0021】図1は、本発明の光アッテネータにおける各光学素子の配置構成の一例を示した模式的な側面図である。この図で、平行平板複屈折結晶3、4の中の矢印は、異常光の光線が常光の光線から分離する方向を示している。即ち、平行平板複屈折結晶3における分離方向は上方向であり、平行平板複屈折結晶4における分離方向は下方向である。そして、それらの分離の幅は等しくなっている。

【0022】図2は、図1に示す光アッテネータにおける直交する2成分の偏光ビームの振る舞いを示している。図2において、平行平板複屈折結晶3、4は、光ビームを互いに直交する2成分の直線偏光に分離もしくは合成する役割を担っている。また、第1のレンズ3は、第1の光ファイバ1から出射した光を結像する作用または平行光に変換する作用を担い、かつ2つの直交する偏光を磁気光学結晶7の位置にてほぼ交差させる作用を担う。

【0023】図2(a)は、減衰量が最小となる場合の2つの偏光成分ビームの振る舞いを示す。この実施形態では、光が入射する第1の光ファイバ1と第2の光ファイバ2の間にレンズを2枚設けた結合光学系が構成されており、透過光は第2の光ファイバ2の端面に集光して同ファイバ内に入射する。第1の光ファイバ1から出射した光ビームは、まず平行平板複屈折結晶3にて互いに直交する2成分の直線偏光に分離され、レンズ5を透過した後、両直線偏光は互いに交差するが、その交差位置に磁気光学結晶7が配置される。そして、磁気光学結晶7によって $\pi/2$ 程度のファラデー回転を受けた2成分の直線偏光は、レンズ6にて収束光に変換され、平行平板複屈折結晶4を透過して再び単一の光ビームに合成され、光路8を経由して、光ファイバの端面に達する。

【0024】図2(b)は、減衰量が最大になる場合の2つの偏光成分ビームの振る舞いを示す。この場合、磁気光学結晶7によるファラデー回転が、ほぼ零になっている結果、平行平板複屈折結晶3を異常光として通過した光ビームは、平行平板複屈折結晶4を同じく異常光として通過する。また、平行平板複屈折結晶3を常光として通過した光ビームは、平行平板複屈折結晶4を同じく常光として通過する。そのときの光路は9、10で示され、第2の光ファイバ2には結合しない。

【0025】次に、中間の減衰量が得られるときの動作

状態について説明する。磁気光学結晶7では、直交する2成分の直線偏光は、それぞれ最大時には $\pi/2$ radを越えたファラデー回転を受ける。そして、磁気光学結晶7に印加する磁界の向きを光透過方向から傾けると、ファラデー回転角は減少し、平行平板複屈折結晶4に入射する2つの直線偏光の偏光方向は、平行平板複屈折結晶4の常光と異常光のいずれの偏光方向とも一致なくなる。その結果、入射したそれぞれの直線偏光に偏光分離が生じ、平行平板複屈折結晶4を透過した後の光ビームの経路は、図2(a)の光路8、図2(b)の光路9および10の3種類となる。このうち、光路8を通過したものだけが第2の光ファイバ2に結合する。

【0026】ところで、ファラデー回転角を0から $\pi/2$ radまで変化させることができれば、減衰量の可変範囲を大きくとることができる。しかしながら、実際には、電磁石による磁界を強くしても、光の進行方向と磁化方向を直交させることは、容易ではない。その結果、ファラデー回転角は零にならず、減衰量が大きくとれないことになる。そこで、偏光分離素子の偏光分離方向と光の偏光方向が少しずれても、それによる損失は、あまり大きくないということに着目する。そして、減衰量の最小値を、やや犠牲にして減衰量の最大値を確保するという手段をとる。そのためには、ファラデー回転角を $\pi/2$ radよりも大きくし、2つの偏光分離素子の偏光分離方向を π radから、ずらせるとよい。そうすると、そのずれ分とファラデー回転角が一致したとき、即ち、ファラデー回転角が零になる前に減衰量を最大にすることができる。

【0027】また、第1および第2の偏光分離素子として、光学軸（常光と異常光の屈折率が等しくなる結晶軸の方向）を光線方向から傾けた平行平板の1軸性複屈折結晶が有用である。しかし、これに限らず、周期的な屈折率分布を持つ人工的な複屈折物質を用いることもできる。

【0028】さらには、結合光学系としては、第1と第2のレンズの主面間の距離をそれらのレンズの焦点距離の和とする共焦点系が有用である。そうすると、組立時の、位置ずれに対する許容度を大きくとることができる。また、光ファイバに、TEC（コア拡大）ファイバを用いると、レンズ間の中央部でのスポットサイズを小さくし、しかも位置ずれに対する許容度の大きな光学系を得ることができる。

【0029】

【実施例】次に、本発明を実施例によって詳細に説明する。

【0030】図3に、本発明の一実施例である光アッテネータの筐体内部の構造を示す。この図は、透過光の光路を含む水平面で切断した断面図を示している。筐体42の左右に取り付けられた光ファイバ31、32の間の光路上に、集光用のレンズ35、36、平行平板複屈折

結晶としてルチル結晶31、34、磁気光学素子39としてビスマス置換ガドリニウム鉄ガーネット〔(GdBi)₃(FeAlGa)₅O₁₂〕をそれぞれ配置する。なお、同ガーネットは、永久磁石37、38によって磁気飽和している。また、光路に直交する方向に可変磁界を印加するためのヨーク柱40が設置され、さらに、その周囲に導線が数百ターン巻かれたコイル41が配置される。上記の各光学素子の配置は、図1に示した光学素子の配置構成の一例と基本的に同一構成であり、各光学素子の透過光の有効入射領域は、すべて1.0×1.0mmとしている。

【0031】ビスマス置換ガドリニウム鉄ガーネット39のファラデー回転角は、ヨーク柱40から生じる磁界強度が零の時に $\pi/2$ rad以上とする。同ガーネットは液層エピタキシャル法にて作製されるが、光アッテネータが用いられる光波長領域に対応する素子の場合、同方法では現状では最大でも1rad程度のファラデー回転角が得られる厚さの素子しか作製できない。そこで、複数枚の素子を貼り合わせるか、光透過方向に並べて配置することで、合計で $\pi/2$ rad以上のファラデー回

20 転角を得られる構成とする方法が一般的である。ただし、本実施例の光アッテネータにおいては、同ガーネットの表面の光損傷を避けるために、複数枚のビスマス置換ガドリニウム鉄ガーネットは光路面内に接着剤の介在しない方法で固定される。即ち、ホルダと半田にて固定される。

【0032】一方、各ルチル平行平板、各レンズは、同じくヨーク柱から生じる磁界強度が零の状態で、透過光の光ファイバへの透過損失が最小になるように設定される。即ち、ルチル平行平板に関しては、その異常光の分離方向が逆であり、レンズに関しては、レンズは同一種類のレンズを使用し、光ファイバも同一種類のものを用いている。そして、ボビンに巻かれたコイル線に電流を加え、その値を増加させると、ヨーク柱により印加される可変磁界が増加し、それに従って同ガーネットにおけるファラデー回転角は徐々に減少し、光ファイバへの光ビームの結合損失が増加する。言い換えると、透過減衰量が増加する。

【0033】以上のようにして作製した光アッテネータにおいて、印加した電流と光アッテネータの減衰量の関係、および印加した電流と光アッテネータの減衰量の偏光依存性との関係について測定した。その結果を図9で示したテーパ型ルチル板を用いた光アッテネータ（以下、従来例と称する）の測定結果とともに、図5と図6に示した。また、図7は、光アッテネータ内の電磁石に流す電流と、その電磁石により実際に発生する磁界強度との関係を示す図である。本発明における光アッテネータの実施例および従来例の双方で共にこの関係は同一となっている。なお、本発明における光アッテネータの実施例および従来例では、磁気光学結晶として前記のとお

り同一組成のビスマス置換ガドリニウム鉄ガーネットが用いられており、磁気飽和のために印加される永久磁石の印加磁界強度も共に約250Gと同一条件である。

【0034】図5によれば、印加する電流に対する減衰量の特性は、本実施例と従来例において、ほぼ同等といえる。次に、図6を用いて、減衰量の偏光依存性について、本実施例と従来例を比較する。この図の縦軸は、PDL（偏光依存性損失、Polarization Dependent Loss）を示す。ここで、PDLとは、入射光の偏光状態をポアンカレ球上のあらゆる点をとるように変化させたときの最大減衰量と最小減衰量の差である。同図によれば、従来例では、電流の上昇、即ち、減衰量の増加と共にPDL（偏光依存性損失）が増大しているが、本発明の構成による光アッテネータにおいては、この数値の増加を大きく低減することができた。即ち、入射光に対し、その消光比や偏光面の向きに依らず、一定の減衰量を与えることのできる光アッテネータを開発することができた。

【0035】

20 【発明の効果】以上示したように、本発明によれば、どのような減衰量の場合であっても、入射光の消光比や偏光面の向きなどの偏光状態に起因する減衰量の変動が小さい光アッテネータを提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の光アッテネータの構成を示す模式的な側面図。

【図2】本発明の光アッテネータにおける透過光線の振る舞いを示す図。図2（a）は、減衰量が最小の場合の透過光線の振る舞いを示す図であり、図2（b）は減衰量が最大の場合の透過光線の振る舞いを示す図。

30 【図3】本発明の光アッテネータの筐体内部の部品配置を示す模式図。

【図4】磁気光学素子のファラデー回転角の光学面内ばらつきの一例を示す図。

【図5】減衰量と電磁石に流す電流との関係を示す図。

【図6】PDL（偏波依存性損失）と電磁石に流す電流との関係を示す図。

【図7】電磁石による磁界強度と電流の関係を示す図。

40 【図8】従来の光アッテネータの第1の例における構成を示す図。

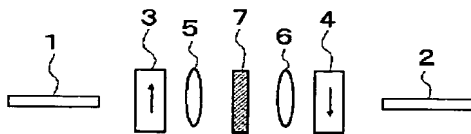
【図9】従来の光アッテネータの第2の例における構成と動作を示す図。

【符号の説明】

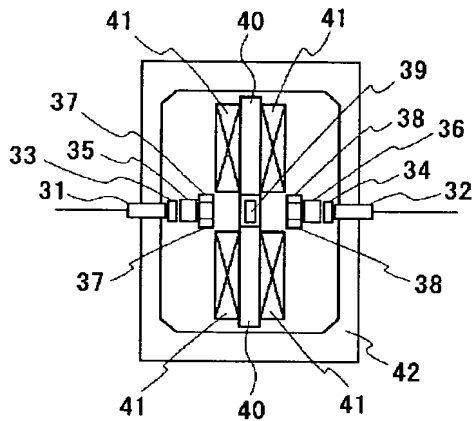
- 1 第1の光ファイバ
- 2 第2の光ファイバ
- 3 第1の偏光分離素子
- 4 第2の偏光分離素子
- 5 第1のレンズ
- 6 第2のレンズ
- 50 7 磁気光学素子

- 8, 9, 10 光路
 31, 32 光ファイバ
 33, 34 平行平板複屈折結晶
 35, 36 レンズ
 37, 38 永久磁石
 39 ガーネット
 40 ヨーク柱
 41 コイル
 42 筐体
 81 光ビーム

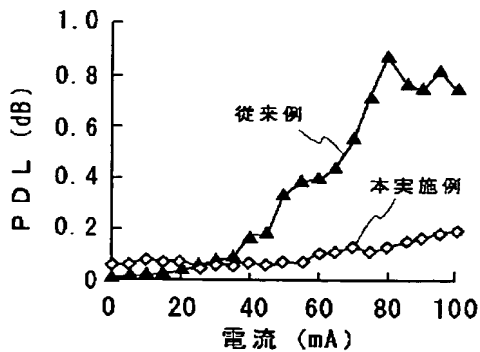
【図1】



【図3】



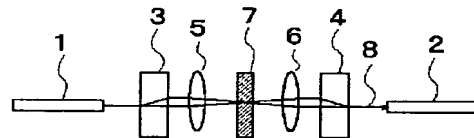
【図6】



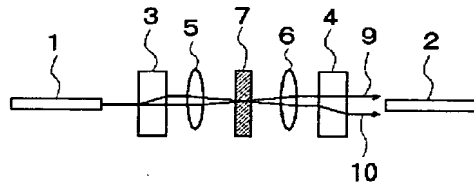
- 82 偏光子
 83 磁気光学結晶
 84 永久磁石
 85 電磁石
 86 可変電流源
 91, 92 光ファイバ
 93, 94 レンズ
 95, 96 テーパー状複屈折結晶
 97 ファラデー回転子
 10 98 光ビーム

【図2】

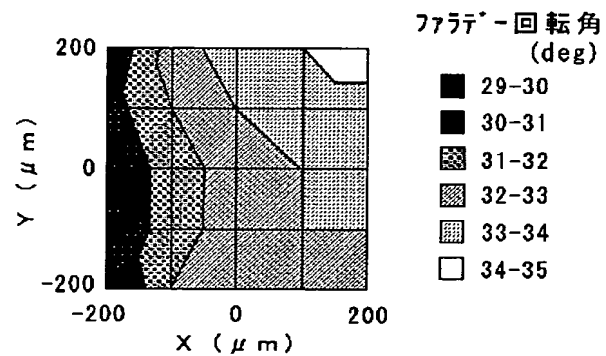
(a)



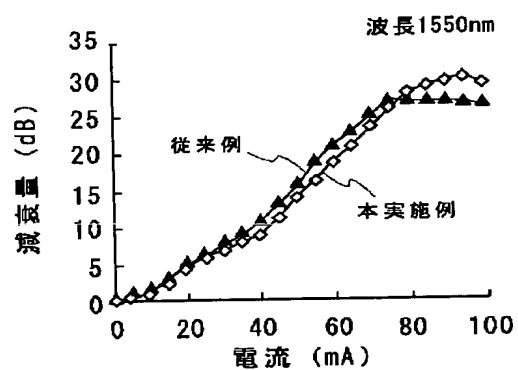
(b)



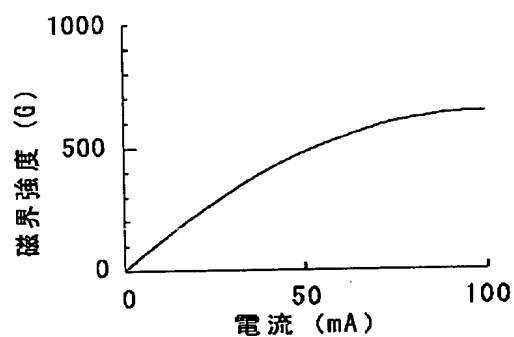
【図4】



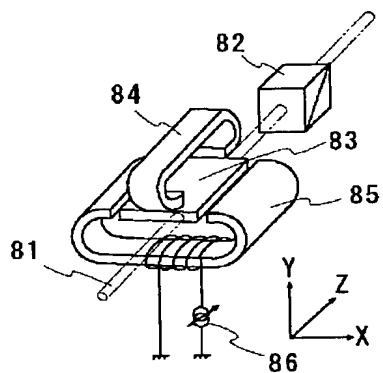
【図5】



【図7】



【図8】



【図9】

